

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



## TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

**Ing. Pavel Pošta**

**Modulátor maticového měniče**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2014

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Pavel Pošta  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Stanislav Fligl, Ph.D.  
ŠKODA ELECTRIC a.s.  
Pekařská 10, 155 00 Praha 5

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru  
Elektrické stroje, přístroje a pohony  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

## **Obsah**

1.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	1
2.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	2
3.	METODY ZPRACOVÁNÍ .....	2
4.	VÝSLEDKY .....	4
5.	ZÁVĚR .....	9
	Seznam v tezích použité literatury .....	11
	Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci .....	16
	Seznam prací disertanta – ostatní .....	17
	Bez ohlasů a recenzí .....	18
	ABSTRACT .....	19
	ANOTACE .....	20
	Seznam použitých zkratk .....	21

## 1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Problematika maticových měničů není novým tématem, je řešena v odborných člancích a na konferencích již od osmdesátých let dvacátého století [1] – [3]. Vlastní realizace maticových měničů byla nepřímo podpořena díky vývoji v oblasti výkonové elektroniky, ale souvisí i s nárůstem výpočetního výkonu mikropočítačů. Kolem roku 2000 vzniká na téma maticových měničů celá řada publikací, článků a funkčních vzorků [5] – [13]. Pro získání přehledu o postupu ve vývoji v této oblasti lze doporučit článek [4]. Přesto, že byla publikována celá řada topologií maticových měničů [14] – [16] a regulačních strategií [17] – [21], nedošlo k velkému rozšíření těchto měničů v průmyslu. Důvodem je pravděpodobně velký počet výkonových prvků, složitost regulační strategie a nižší napěťový přenos. Výhodou maticových měničů je absence akumulačního prvku, díky níž je možné dosáhnout úspory hmotnosti a rozměrů měniče. Pro většinu regulovaných pohonů, nevýhody maticového měniče převažují nad jeho výhodami, což brání jeho dalšímu rozšíření. Uplatnění maticových měničů lze tedy očekávat obzvláště v oblastech, kde rozměry resp. hmotnost měniče hrají zásadní roli [31], [33]. V případě nepřímých měničů kmitočtu s napěťovým meziobvodem, je pro měnič limitující životnost kondenzátoru použitého v meziobvodu (především pro případ elektrolytických kondenzátorů). Z tohoto důvodu by dalším místem uplatnění mohly být aplikace, vyžadující nízké servisní nároky resp. dlouhý interval mezi nimi [32], nebo aplikace pracující ve vyšších teplotách, kde teplota výrazně zkracuje životnost kondenzátoru.

K dispozici začínají být bezpotenciálové moduly, realizující větší či menší část maticového měniče. Příkladem může být modul obousměrného spínače SK 60 GM 123 (SEMIKRON) [34], modul jedné fáze maticového měniče FS150R17KE3\_K (EUPEC) [35] nebo obdobný modul realizovaný pomocí technologie RB-IGBT (SEMELAB) [36]. Velcí výrobci polovodičových prvků nám tímto dávají signál, že v oblasti maticových měničů vidí potenciál, a mají zájem o rozvoj v této oblasti.

V současné době společnost Yaskawa nabízí dvě produktové řady přímých měničů kmitočtu. První varianta je určena pro nízké napětí 200 V resp. 400 V a pohony 5,5 kW až 160 kW [37]. V druhé variantě jde o vysokonapěťové měniče 3000 V resp. 6000 V o výkonu 200 kVA až 6 MVA [38].

Vývoj maticových měničů na Katedře elektrických pohonů a trakce ČVUT v Praze započal v rámci disertační práce [22], jež byla obhájena v roce 2006.

Výsledkem této práce byl vznik prototypu maticového měniče o výkonu 12 kW. Na tomto maticovém měniči bylo vyvinuto přímé řízení momentu asynchronního motoru [23]. Tato práce byla obhájena v roce 2009. Souběžně probíhaly pod vedením mého školitele a školitele specialisty bakalářské a diplomové práce na nově vyvíjeném prototypu kompaktního maticového měniče [24] – [30]. V současné době v návaznosti na zmíněný kompaktní maticový měnič pokračuje realizace tří disertačních prací.

## **2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Práce se podrobně nezabývá ani silovou částí maticového měniče, ani regulací vlastního pohonu, ale její těžiště spočívá v porovnání variant, návrhu, realizaci a implementaci části vykonávající spínací algoritmus, což v případě maticového měniče znamená řešení jak komutační, tak modulační strategie. Odtud vyplývají následující cíle:

- Výběr a implementace z hlediska spolehlivosti optimální komutační strategie.
- Porovnání, volba, optimalizace, návrh a implementace modulační strategie s ohledem na vlastnosti hardwaru.
- Konfigurace modulátoru pro přímé řízení momentu.
- Analýza a kompenzace vlivu mrtvých dob a minimálních dob sepnutí na generované výstupní napětí.
- Návrh a realizace rozhraní modulátoru.
- Stanovení způsobu estimace výstupního napětí.
- Komplexní realizace a verifikace funkčnosti modulátoru pro maticový měnič.

## **3. METODY ZPRACOVÁNÍ**

Prvním krokem pro volbu jak komutační, tak modulační strategie, bylo sestavení přehledu těchto strategií a jejich vzájemné porovnání. Přehledové schéma kompaktního maticového měniče, včetně rozdělení regulační části do bloků, je uvedeno na obr. 1. Komutace a modulace jsou na sobě v podstatě nezávislé, ale při vhodné kombinaci obou strategií se mohou vzájemně doplňovat. Tento fakt bylo třeba zohlednit stejně tak jako vlastnosti hardwaru vyvíjeného maticového měniče. Na základě požadavku na robustnost použitých strategií byla zvolena čtyřkroková komutační strategie a modulační strategie ISVM optimalizovaná s ohledem na vybranou metodu komutace.

Modulační strategie přizpůsobená na robustnost komutace vyžaduje sepnutí nulového vektoru, jak na konci spínací periody, tak ve středu aktivních stavů.

Společně s požadavkem konfigurace modulátoru pro přímé řízení momentu, tím vzniklo zadání na úpravu modulátoru vyvinutého v rámci diplomové práce [25]. Takto upravený modulátor byl doplněn o část komunikace a měření, jež byla popsána v odborné studii [28]. Tímto krokem jsme získali rozhraní k bloku realizujícímu komutaci a časování modulátoru (implementováno v hradlovém poli, zdrojový kód v jazyce VHDL). Dalším krokem bylo sestavení rozhraní směrem k regulaci pohonu. Na základě zkušenosti s modulátory z nepřímých měničů kmitočtu a analýzy regulačních struktur pohonů byly zvoleny čtyři možnosti zadání požadovaného výstupního napětí:

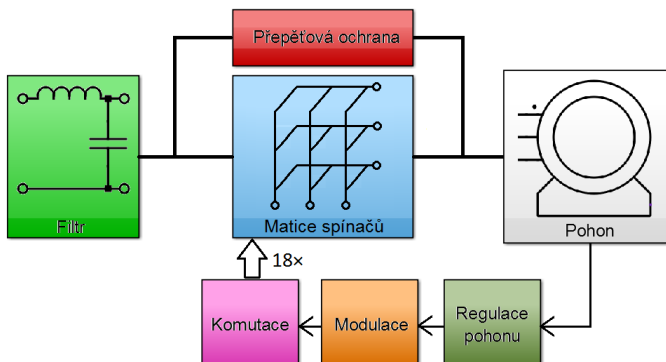
- okamžitá hodnota třířázového výstupního napětí (ABC)
- výstupní napětí ve složkách Alfa – Beta
- výstupní napětí ve složkách Alfa – Beta vyjádřené v polárních souřadnicích
- modul výstupního napětí a výstupní frekvence

Tyto čtyři způsoby zadání do modulátoru, společně s přímým zadáním sepnutí (přímé řízení momentu a prediktivní metody regulace), vyhovují celé řadě regulačních struktur známých z nepřímých měničů.

Na základě znalosti rozhraní, bylo možné sestavit simulaci modulátoru v programech Matlab Simulink a Plecs. Část realizovaná v hradlovém poli je simulována pomocí bloků C-Script, zatímco část realizující modulační strategii a její optimalizace (realizováno na cílovém HW procesorem, zdrojový kód v jazyce C) pomocí bloku MATLAB Function. Díky tomuto řešení dosáhneme přijatelného času simulace a možnost pracovat přímo se zdrojovými kódy v jazyce C. Po sestavení základní modulační strategie v simulaci byl algoritmus modulátoru integrován do RTOS jádra měniče. Na základě porovnání výsledků simulace a měření byla ověřena platnost modelu, a bylo možné postupovat ve vývoji optimalizací modulační strategie.

Nepřímá modulace prostorového vektoru byla pro maticový měnič, včetně jednotlivých optimalizací, ověřena jak pomocí simulace, tak pomocí měření na reálném HW vyvíjeného maticového měniče. Pro porovnání a zhodnocení výsledků je pro případ simulace používána filtrace výstupního napětí měniče klouzavým průměrem (délka filtru 1 ms) a volitelně následný výpočet střední hodnoty. Tuto metodu jsem volil vzhledem k její rychlosti a možnosti sledovat trend průběhu. Pro zhodnocení výsledků získaných měřením považuji za výhodnější použít vyhodnocení spektra požadovaného průběhu. Z tohoto důvodu bylo spektrum vyhodnocováno i pro simulace (možné objektivně srovnat simulovaná a měřená data).





**Obr. 1: Blokové schéma kompaktního maticového měniče**

#### 4. VÝSLEDKY

Výsledkem práce je modulátor maticového měniče, který sestává ze dvou částí. První částí je konfigurace hradlového pole, realizující komutační strategii, měření a časování modulátoru. Druhou částí je modul realizující výpočet časů sepnutí a jednotlivé optimalizace. Součástí tohoto modulu je estimace výstupního napětí, přímé zadání spínací kombinace a některé podpůrné funkce pro práci s maticovým měničem. Obě tyto části jsou spravovány pomocí verzovacího systému Mercurial.

Pro ověření alespoň dílčí platnosti modelu byla provedena simulace teoretického maxima výstupního napětí. Spektrum výstupního napětí pro tento případ je zobrazeno na obr. 2. Přesným odečtením základní harmonické získáme odchylku mezi simulovaným a teoretickým maximem 1,4 %. Tuto odchylku lze přisoudit použití reálné spínací periody a komutaci prvků (nastavena na minimum umožněné simulací).

Pro možnost estimace výstupního napětí byly sestaveny odpovídající rovnice (1), jež na základě vstupního napětí, spínací kombinace, a časů sepnutí umožňují spočítat napětí na výstupu měniče.

$$u_{2e\alpha} = \frac{u_{\gamma\alpha} \cdot t_{\gamma\alpha} + u_{\delta\alpha} \cdot t_{\delta\alpha}}{T_s} + \frac{u_{\gamma\beta} \cdot t_{\gamma\beta} + u_{\delta\beta} \cdot t_{\delta\beta}}{T_s} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (1)$$

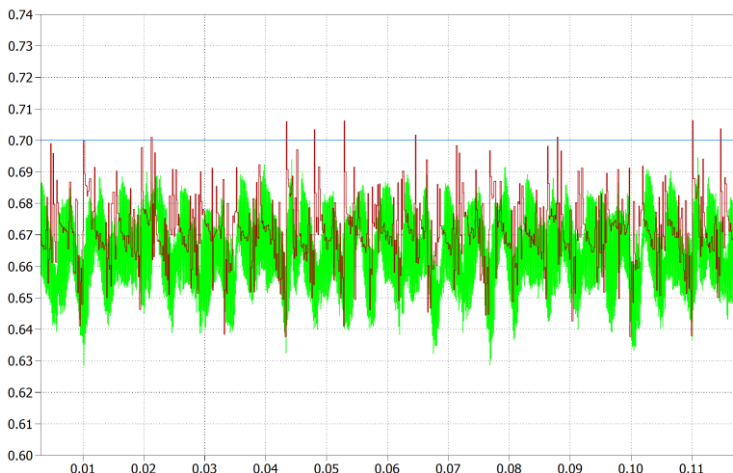
$$u_{2e\beta} = \frac{u_{\gamma\beta} \cdot t_{\gamma\beta} + u_{\delta\beta} \cdot t_{\delta\beta}}{T_s} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

kde  $u_{2e\alpha}$  a  $u_{2e\beta}$  jsou Alfa – Beta složky estimovaného výstupního napětí daného sektoru,  $t_{\delta\alpha}$ ,  $t_{\delta\beta}$ ,  $t_{\gamma\alpha}$ ,  $t_{\gamma\beta}$  jsou časy sepnutí daného spínacího vektoru,  $T_s$  je spínací perioda modulátoru a  $u_{\delta\alpha}$ ,  $u_{\delta\beta}$ ,  $u_{\gamma\alpha}$ ,  $u_{\gamma\beta}$  jsou okamžité hodnoty virtuálního napětí meziobvodu pro dané spínací kombinace.



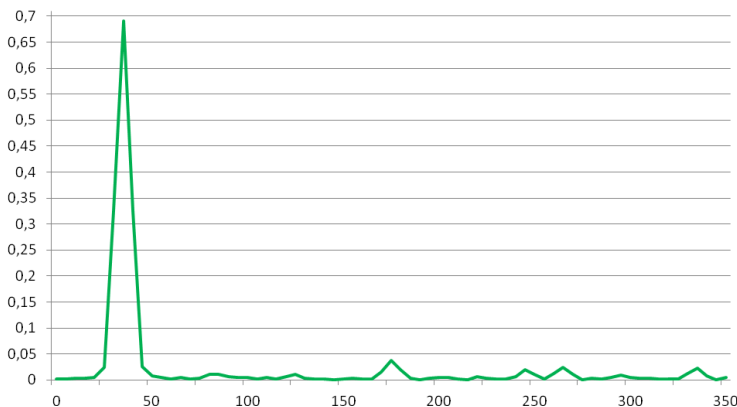
**Obr. 2: Simulace teoretického maxima výstupního napětí maticového měniče**

Na základě teoretické analýzy spínání pro použité komutační a modulační strategie, byl rozpoznán vliv komutačního zpoždění na výstupní napětí. Pro ověření správnosti této teorie byla implementována korekce komutační doby do estimace výstupního napětí. V simulaci bylo porovnáno napětí na výstupu měniče s jeho estimovanou hodnotou. Odchylka střední hodnoty modulu simulovaného a estimovaného napětí je menší než 0,5 % a odpovídá spočtené teoretické hodnotě s odchylkou menší než 1,5 %. Zmenšení napětíového využití maticového měniče vlivem minimálních dob sepnutí bylo verifikováno pro několik spínacích frekvencí. Simulace potvrdila teoretický předpoklad, že napětíové využití s klesajícím spínacím kmitočtem (při konstantních minimálních dobách sepnutí) roste. Odchylka teoretického předpokladu a výsledku simulace je pro pracovní spínací kmitočet 0,7 %. Tato situace je zobrazena na obr. 3. Pro tuto variantu bylo provedeno i měření na reálném měniči, které potvrzuje správnost simulovaného napětí na výstupu měniče.



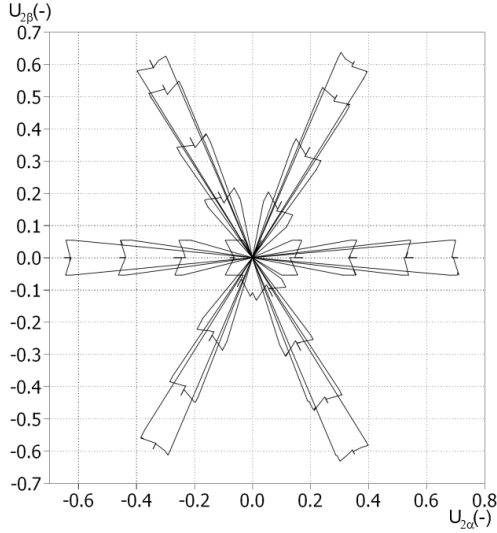
**Obr. 3: Porovnání zadaného (modrá), měřeného (zelená) a estimovaného (červená) modulu výstupního napětí - simulace**

Na základě ověření příčiny vzniku poklesu napětíového přenosu měniče, byla implementována kompenzace komutačních dob. Díky této úpravě modul výstupního napětí v simulaci prakticky odpovídá požadované hodnotě. Při porovnání simulace a reálného měření byla zaznamenána odchylka 0,6 % (obr. 4). Tuto odchylku lze zahrnout do chyb způsobených úbytkem napětí reálných součástek a dalšími jevy, které nejsou v simulaci zahrnuty.



**Obr. 4: Spektrum výstupního napětí s kompenzací doby komutace (modul = 0,7 frekvence = 35 Hz) - měření**

Vzhledem k nutnosti dodržovat minimální doby sepnutí, dochází typicky v modulátoru k vynechání nebo prodloužení krátkých sepnutí. Graficky lze tyto nezbytné korekce znázornit např. vynesemím do polárního grafu viz obr. 5, kde je vykresleno výstupní napětí pouze pro případ korekce času sepnutí, pro rostoucí amplitudu výstupního napětí o frekvenci 20Hz.



**Obr. 5: Korekce spínací doby pro virtuální střídač maticového měniče.**

Jak je patrné, tato úprava zadané doby sepnutí způsobuje nepřesnost vstupního resp. výstupního prostorového vektoru. Na základě linearizace soustavy rovnic (1) v okolí generovaného napětíového vektoru byly sestaveny rovnice pro výpočet odchylky výstupního napětí respektující tak odchylky spínacích časů (2).

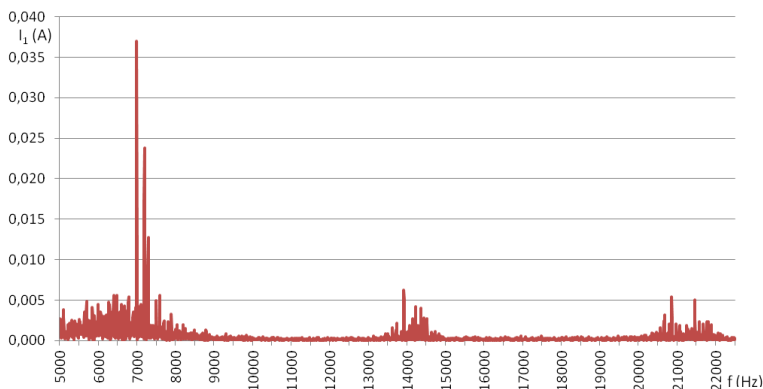
$$\Delta \underline{u}_{2e} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\gamma\alpha}}{T_s} & \frac{u_{\gamma\beta}}{2T_s} & \frac{u_{\delta\alpha}}{T_s} & \frac{u_{\delta\beta}}{2T_s} \\ 0 & \frac{\sqrt{3} \cdot u_{\gamma\beta}}{2T_s} & 0 & \frac{\sqrt{3} \cdot u_{\delta\beta}}{2T_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_{\gamma\alpha} \\ \Delta t_{\gamma\beta} \\ \Delta t_{\delta\alpha} \\ \Delta t_{\delta\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde  $\Delta \underline{u}_{2e}$  je vektor odchylky výstupního napětí,  $\Delta t_{\delta\alpha}$ ,  $\Delta t_{\delta\beta}$ ,  $\Delta t_{\gamma\alpha}$ ,  $\Delta t_{\gamma\beta}$  jsou odchylky časů sepnutí daného spínacího vektoru a  $u_{\delta\alpha}$ ,  $u_{\delta\beta}$ ,  $u_{\gamma\alpha}$ ,  $u_{\gamma\beta}$

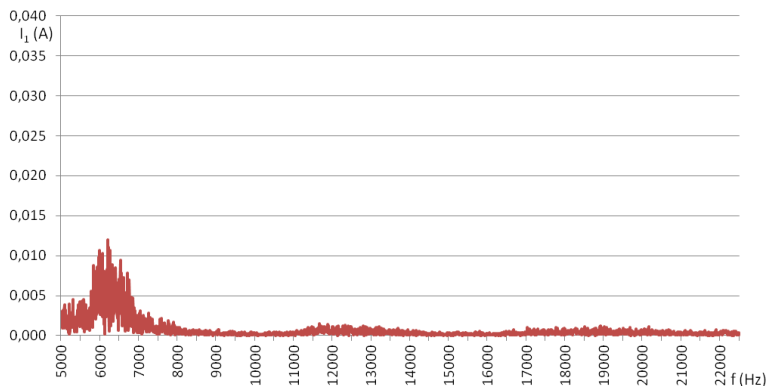
jsou okamžité hodnoty virtuálního napětí meziobvodu pro dané spínací kombinace.

S využitím těchto rovnic, byl pro modulátor sestaven algoritmus, který umožňuje korigovat amplitudu výstupního napětí tak, aby přesněji odpovídal zadání. Na základě vyhodnocení spektra byl změřen pokles THD výstupního napětí o 6,5 %.

Pro realizovaný maticový měnič byla dále vyvinuta a odzkoušet metoda rozmitání spínací frekvence. Ta se využívá ve speciálních případech za účelem potlačení spínací frekvence ve vstupním proudu měniče. Teorie říká, že při změně spínací frekvence dojde k rozproštění energie rušení od spínání do větší části spektra. Implementovaný algoritmus umožňuje zadat stupeň rozmitání, což představuje prodloužení spínací periody (přičemž je zajištěno dodržení maximální spínací frekvence). Pro porovnání vlivu rozmitání spínací frekvence jsem provedl vyhodnocení spektra vstupního proudu v oblasti spínací frekvence a jejich násobků, viz obr. 6. Na obr. 7 je ve stejném měřítku zaznamenáno vyhodnocení spektra vstupního proudu pro stupeň rozmitání 25 %. Porovnáním těchto spekter zjistíme, že rozmitáním spínací frekvence skutečně dochází k redukci efektivní hodnoty. Nejvýraznější složka spektra, způsobená spínáním, se sníží o více než 67,5 %.



**Obr. 6: Spektrum vstupního proudu – konstantní spínací frekvence – měření**



**Obr. 7: Spektrum vstupního proudu – rozmitaná spínací frekvence – měření**

## 5. ZÁVĚR

V této práci je nejprve provedena stručná rešerše topologií maticových měničů. Následuje přehled a porovnání komutačních strategií vhodných pro nově vyvíjený kompaktní maticový měnič a na tomto základě byla také zvolena použitá komutační strategie pro výslednou implementaci maticového měniče. Dále je uveden přehled nejdůležitějších modulačních strategií a i zde jsou stanovena kritéria pro výběr nejvhodnější varianty. Podle nich byla pro výslednou realizaci vybrána metoda nepřímé modulace prostorového vektoru. Tato strategie je z různých hledisek optimalizována a implementovaná metoda je blíže prezentována.

Pro zvolenou komutační a modulační strategii byla provedena analýza spínání s cílem vyšetřit vliv minimálních dob sepnutí a mrtvých dob výkonových prvků. Nejzajímavějším je zjištění, že díky zvolené komutační a modulační strategii jsou zachovány komutační zpoždění bez ohledu na polaritu výstupního proudu nebo vstupního napětí. Závěry z této analýzy byly nejdříve ověřeny pomocí simulace a následně potvrzeny i měřením na cílovém hardwaru. Naměřené průběhy se shodují s teorií uvedenou v práci. Na základě analýzy vlivu minimálních dob sepnutí a mrtvých dob byly do modulátoru implementovány algoritmy umožňující minimalizaci jejich vlivu na výstupní napětí. Díky kompenzaci komutace obousměrného spínače klesne chyba výstupního napětí na méně než šestinu původní hodnoty. Korekcí minimálních dob sepnutí dojde k poklesu THD výstupního napětí o 6,5 %.

Během této práce byl vyvinut modulátor maticového měniče, který má definované rozhraní a umožňuje používat v práci prezentované optimalizace.

Kromě implementace nepřímé modulace prostorového vektoru je implementováno rozhraní pro konfiguraci modulátoru, vhodné pro přímé řízení momentu, a blok umožňující estimaci výstupního napětí měniče. Vzhledem ke způsobu realizace modulátoru bylo za účelem snížení vlivu spínací frekvence na spektrum vstupního proudu možné implementovat rozmítání spínací frekvence maticového měniče, Analýza spektra vstupního proudu prokázala potlačení složky, odpovídající spínací frekvenci, na méně než  $1/3$  původní hodnoty.

## Seznam v tezích použité literatury

- [1] Venturini, M. A new sine wave in sine wave out, conversion technique which eliminates reactive elements. In: *Powercon 7 Seventh National Solid-State Power Conversion Conference*. San Diego, California: Power Concepts, 1980, pp. E3/1–E3/15. RN 4776(7).
- [2] Roy, G. April, G. E. Cycloconverter operation under a new scalar control algorithm. In: *20th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.* Milwaukee, WI: IEEE, 1989, pp. 368–375. DOI: 10.1109/PESC.1989.48511.
- [3] Burany, N. Safe Control of Four-Quadrant Switches. In: *Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, Conference Record of the 1989 IEEE*. San Diego, CA: IEEE, 1989, pp. 1190 – 1194. DOI: 10.1109/IAS.1989.96794.
- [4] Friedli, T. Kolar J. W.: Milestones in Matrix Converter Research. In: *IEEEJ Journal of Industry Applications*. 2012, Vol. 1, No. 1, pp. 2-14. ISSN: 2187-1094.
- [5] Matteini, M. *Control Techniques for Matrix Converters Adjustable Speed Drivers*. Bologna: 2001. Ph.D. Thesis. University of Bologna, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering.
- [6] Zarri, L. *Control of Matrix Converters*. Bologna: 2007. Ph.D. Thesis. University of Bologna, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering.
- [7] Mahlein, J. Igney, J. Braun, M. Simon, O. Robust Matrix Converter Commutation without explicit Sign Measurement. In: *Proceedings of EPE 2001* [online]. 2001. [25.7.2014]. Dostupné z: [http://www.betz-simon.homepage.t-online.de/mu/2001\\_EPE\\_Robust\\_Kommutation.pdf](http://www.betz-simon.homepage.t-online.de/mu/2001_EPE_Robust_Kommutation.pdf).
- [8] Casadei, D. Serra, G. Tani, A. The Use of Matrix Converters in Direct Torque Control of Induction Machines. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2001, Vol. 48, No. 6, pp. 1057-1064. ISSN: 0278-0046.



- [9] Terunuma, T. Konishi, Y. Takada, T. Matsuse, K. Compensation Method of Matrix Converter Drive System for commutation voltage error and unbalanced input voltage. In: *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*. Porto: IEEE, 2009. pp. 4505-4510. ISBN: 978-1-4244-4648-3.
- [10] Yoon, Y. D. Sul, S. K. Carrier-Based Modulation Technique for Matrix Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006, Vol. 21, Issue 6, pp. 1691-1703, ISSN: 0885-8993.
- [11] Kouro, S. Cortes, P. Vargas, R. Ammann, U. Rodriguez, J. Model Predictive Control-A Simple and Powerful Method to Control Power Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, Vol. 56, No. 6, pp. 1826-1838. ISSN: 278-0046.
- [12] Simon, O. Mahlein, J. Muenzer, M. N. Bruckmarm, M. Modern Solutions for Industrial Matrix-Converter Applications. *Industrial, IEEE Transactions on Electronics*. 2002, Vol. 49, Issue 2, pp. 401-406, ISSN: 0278-0046.
- [13] Mahlein, J. Igney, J. Weigold, J. Braun, M. Simon, O. Matrix Converter Commutation Strategies With and Without Explicit Input Voltage Sign Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002, Vol. 49, Issue 2, pp. 407-414. ISSN: 0278-0046.
- [14] Kolar, J. W. Friedli, T. Rodriguez, J. Wheeler, P. W.: *Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Vol.:58, Issue: 11), Nov. 2011, ISSN: 0278-0046.
- [15] Lixiang, W. Lipo, T. A. Chan, H. Matrix Converter Topologies With Reduced Number of Switches. *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*. Madison, WI: IEEE, 2002, Vol: 1, pp. 57-63. ISBN: 0-7803-7262-X.
- [16] Kolar, J. W. Baumann, M. Schafmeister, F. Ertl, H. Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*. Dallas, TX: IEEE, 2002, Vol. 2, pp. 777-791. ISBN: 0-7803-7404-5.
- [17] Rodriguez, J. Rivera, M. Kolar, J. W. Wheeler, P.W. A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012, Vol. 59, Issue 1, pp. 58-70. ISSN: 0278-0046.

- [18] Rivera, M. E. Vargas, R. E. Espinoza, J. R. Rodriguez, J. R. Behavior of the Predictive DTC Based Matrix Converter Under Unbalanced AC Supply. *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. New Orleans, LA: IEEE, 2007, pp. 202-207. ISBN: 978-1-4244-1259-4.
- [19] Sim, G. H. Lee, K. B. Huh, S. H. Blaabjerg, F. Robust DTC-SVM Method for Matrix Converter Drives with Model Reference Adaptive Control Scheme. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg: IEEE, 2007, pp. 1-8. ISBN: 978-92-75815-10-8.
- [20] Rodriguez, J. Cortes, P. Kennel, R. Kazmierkowski, M. P. Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters. *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09*. Wuhan: IEEE, 2009, pp. 41-49. ISBN: 978-1-4244-3556-2.
- [21] Rodriguez, J. Pontt, J. Vargas, R. Lazana, P. Ammann, U. Wheeler, P. Garcia, F. Predictive Direct Torque Control of an Induction Motor fed by a Matrix Converter. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg: IEEE, 2007, pp. 1-10. ISBN: 978-92-75815-10-8.
- [22] Flígl, S. *Matrix Converter in Hybrid Drives*. Praha: ČVUT, 2006. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [23] Kuzmanovic, D. *Field Oriented Control and Direct Torque Control of Matrix Converter-Fed Induction Motor*. Praha: ČVUT, 2009. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [24] Cuevas, C. *Matrix Converter IGBT Driver Unit Development and Activation*. Praha: ČVUT, 2006. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [25] Pošta, P. *Stavový automat modulátoru pro kompaktní maticový měnič*. Praha: ČVUT, 2006. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.

- [26] Linhart, L. *Implementace diagnostiky mezifázových zkratů a obsluhy A/D převodníků pro řídicí systém maticového měniče*. Praha: ČVUT, 2008. Individuální semestrální projekt. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [27] Linhart, L. *Modulační strategie maticového měniče*. Praha: ČVUT, 2008. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [28] Posta, P. *The Modulator of the Matrix Converter*. Praha: ČVUT, 2009. Odborná studie. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [29] Linhart, L. *Matrix Converter Modulation Strategy*. Praha: ČVUT, 2010. Odborná studie. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [30] Kučka, J.: *Modulation Strategies for Voltage Converters*. Praha: ČVUT, 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.
- [31] Empringham, L. de Lillo, L. Wheeler, P. W. Clare, J. C. Matrix Converter Protection for More Electric Aircraft Applications. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Paris: IEEE, 2006, pp. 2564-2568. ISBN: 1-4244-0390-1.
- [32] Pahlevaninezhad, M. Eren, S. Bakhshai, A. Jain, P.: A Model Reference Adaptive Controller for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator Fed by a Matrix Converter, *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*. Porto: IEEE, 2009, pp. 65-70. ISBN: 978-1-4244-4648-3.

- [33] Empringham, L. Wheeler, P. Clare, J. Power Density Improvement and Robust Commutation for a 100 kW Si-SiC Matrix Converter. *13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09*. Barcelona: IEEE, 2009, pp. 1-8.  
E-ISBN: 978-1-4244-4432-8.
- [34] Semikron [online]. *IGBT Module SK 60 GM 123 Preliminary Data*. 2005. [25.7.2014]. Dostupné z: <http://www.eltron.pl/elektronika/semikron/pdf/moduly-igbt/igbt-semitop/SK60GM123.pdf>.
- [35] Eupec. *FS150R17KE3\_K Technische Information, IGBT-Module*. 2004. Wölz, M. Rusche, W.
- [36] Semelab ltd. [online]. *SML150MAT12*. 2006. [25.7.2014]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/198098/SEME-LAB/SML150MAT12/+0JJQ--VPDL.CMEGeZTyv.zZMF.H+/datasheet.pdf>.
- [37] *MATRIX Inverter Drive Varispeed AC* [online]. Yaskawa. [25.7.2014]. Dostupné z: <http://www.yaskawa.eu.com/en/drives-motion/ac-inverter-drives/varispeed-ac-the-matrix-drive/description.html>.
- [38] *Matrix Converter with Power Regeneration MXIS* [online]. Yaskawa. [25.7.2014]. Dostupné z: <http://www.yaskawa.eu.com/en/drives-motion/ac-inverter-drives/medium-voltage-inverter-drives/mx1s.html>.

## Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

- Publikace v impaktovaných časopisech  
---
- Publikace v recenzovaných časopisech  
Pošta, P. Communication Between Matrix Converter Modulator and Superset Regulator. *Acta Polytechnica*. 2008, Vol. 2008, No. 3, pp. 3-6. ISSN 1210-2709. 100%
- Patenty  
---
- Publikace excerpované WOS  
---
- Ostatní  
Bauer, J., Pošta, P., Flígl, S., Lettl, J. Universal Embedded Controller for Matrix Converter, *19th International Conference Applied Electronics 2014*. 2014. Přijato na konferenci. 25%  
  
Linhart, L. Pošta, P. Lettl, J. Commutation Time Reduction of Matrix Converter through the Two-Step Methods Combining. In *ELEN 2012*. Praha: ČVUT, 2012, pp. 11-12. ISBN 978-80-01-05096-5. 33%  
  
Pošta, P. Linhart, L. Bauer, J. Lettl, J. Commutation Between Modulator And Superset Regulator of the Matrix Converter. In *Workshop 09 CTU REPORTS*. Praha: ČVUT, 2009, ISBN 978-80-01-04286-1. 25%  
  
Pošta, P. Linhart, L. Bauer, J. Lettl, J. Flígl, S. Komunikace mezi modulátorem a nadřazeným regulátorem maticového měniče. In *XXXI. celostátní konference o elektrických pohonech*. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2009, ISBN 978-80-02-02151-3. 20%  
  
Linhart, L. Pošta, P. Bauer, J. Lettl, J.: Two-step Commutation Method of the Matrix Converter Based on the Voltage Sign Measurement. In *Workshop 09 CTU REPORTS*. Praha: ČVUT, 2009, ISBN 978-80-01-04286-1. 25%

Linhart, L. Pošta, P. Lettl, J.: Comparison of Different Commutation Strategies of Matrix Converter. <i>In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2009 Proceedings</i> . Brno: VUT v Brně, FEL, vol. 1, p. 479-484, 2009, ISBN 978-80-214-3933-7.	33%
Lettl, J. Pošta, P.: Matrix Converter Modulator and Communication with Regulator. <i>In Proceedings of Workshop 2008</i> . Praha: ČVUT, 2008, ISBN 978-80-01-04016-4.	50%
Pošta, P.: Communication Between Matrix Converter Modulator and Superset Regulator. <i>In Poster 2008</i> . Praha: ČVUT, FEL, 2008.	100%
Pošta, P. Fligl, S. Lettl, J.: Concept of Modulator for Matrix Converter, <i>In TRANSCOM 2007 - Proceedings, Section 3 - Information and Communication Technologies</i> . Žilina: University of Žilina, p. 163-166, 2007, ISBN 978-80-8070-693-7.	33%
Pošta, P. Fligl, S. Lettl, J.: Návrh modulátoru pro maticový měnič. <i>In 30. Celostátní konference o elektrických pohonech</i> . Praha: Český svaz vědeckotechnických společností, 2007, ISBN 978-80-02-01921-3.	33%

### Seznam prací disertanta – ostatní

- Publikace v impaktovaných časopisech  
---
- Publikace v recenzovaných časopisech  
---
- Patenty  
---
- Publikace excerpované WOS  
---

- Ostatní

- |   |     |
|---|-----|
| Bauer, J. Lettl, J. Pošta, P.: Řízení usměrňovače s pulzně šířkovou modulací. <i>In XXXI. celostátní konference o elektrických pohonech</i> . Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2009, ISBN 978-80-02-02151-3.               | 33% |
| Bauer, J. Linhart, L. Pošta, P. Lettl, J.: Experimental Results Measured on PWM Rectifier and their Comparison with Thyristor Rectifier. <i>In Workshop 09 CTU REPORTS</i> . Praha: ČVUT, 2009, p. 284-285. ISBN 978-80-01-04286-1. | 33% |

**Bez ohlasů a recenzí**

## ABSTRACT

This thesis deals with the direct converter, also known as matrix converter. This type of converter is still used less than indirect converters. It is caused by greater number of power semiconductors required and higher complexity of control algorithms. On the other hand, matrix converters do require neither heavy inductors nor capacitors in DC links. Using “Sparse” topologies can reduce number of power semiconductors. Some technical articles deals with matrix converters used in aerospace or wind power plants [31] – [33]. Yaskawa Company has a few matrix converters [37], [38] on the product list.

Topic of this thesis, in particular, is the modulator for a compact matrix converter developed at the Department of Electric Drives and Traction, Faculty of Electrical Engineering, CTU in Prague. The aim was to design and implement a modulator that has similar features as an indirect converter. Commutation and modulation strategies suitable for the compact matrix converter prototype were evaluated and chosen in this thesis as well.

Then the achievement of the thesis is also a modulator block implemented partly in both C and VHDL. Output voltage can be entered by several ways (actual value,  $\alpha - \beta$  coordinates, polar coordinates and voltage – frequency). This suits to be used in many of regulation strategies known from indirect converters. Alternatively, an add-on API for direct setting of switching combination was implemented (useful for DTC). In addition, the modulator can run with frequency sweep. Analysis of input current demonstrates reducing injection of switching frequency into input current to less than one third of its original value in this case.

Effects of dead band and minimal switching times of power semiconductors on output voltage were analyzed for used commutation and modulation strategies. Thus, based on mathematical description, a compensation approach for the output-voltage space vector was designed in this thesis. It reduces the error of the output voltage module six times and moreover the THD of the output voltage was decreased by 6.5%.

Converter functions were verified by both the simulation and the measurement on target hardware. Theoretical assumptions and simulation results corresponds well with real measurements. Thanks to designing the combination of commutation and modulation strategy in order to respect each other it resulted into a safely running modulator with a robust switching. Thus, the converter can operate without precise input voltage measurement.



## ANOTACE

Tato práce se zabývá přímým měničem kmitočtu, označovaným též jako maticový měnič. Tento typ měniče stále není zdaleka tak rozšířen, jak je tomu v případě nepřímých měničů kmitočtů. Důvodem je větší počet výkonových prvků a vyšší složitost řízení. Oproti tomu maticové měniče nepotřebují velký a těžký akumulační prvek v meziobvodu. Počet výkonových prvků je možné snížit za předpokladu použití některé z topologií „Sparse“. Nasazením maticových měničů do letectví nebo větrných elektráren se zabývají některé odborné články [31] – [33]. Společnost Yaskawa nabízí již několik maticových měničů [37], [38] ve svém katalogu.

V práci je detailně zpracován modulátor maticového měniče vyvíjeného na Katedře elektrických pohonů a trakce, FEL, ČVUT v Praze. Cílem bylo sestavit modulátor tak, aby se přiblížil modulátorům používaným u nepřímých měničů. V rámci práce byly porovnány jednotlivé komutační a modulační strategie a následně vybrány ty nejvhodnější pro prototyp měniče.

Výsledkem práce je také blok modulátoru realizovaný částečně v jazyce C a částečně v jazyce VHDL. Modulátor akceptuje několik způsobů zadání výstupního napětí (okamžitě hodnoty, složky Alfa – Beta, polární souřadnice a napětí – frekvence), čímž pokrývá potřeby celé řady regulačních struktur známých z nepřímých měničů. Alternativně lze využít také rozhraní pro zadání konkrétní spínací kombinace (vhodné pro přímé řízení momentu). Nadto, díky volitelné funkci rozmítání spínací frekvence je možné výrazně potlačit spínací frekvenci ve spektru vstupního proudu. Analýza spektra vstupního proudu prokázala, že rozmítání spínací frekvence potlačí složku odpovídající spínací frekvenci na méně než 1/3 původní hodnoty.

S ohledem na vlastnosti vybraných strategií byla provedena analýza vlivu mrtvých dob a minimálních dob sepnutí výkonových prvků na výstupní napětí. Na základě matematického popisu měniče byla v této práci odvozena metoda kompenzace mrtvých dob s ohledem na výstupní napětí. Aktivací implementovaného algoritmu kompenzace lze snížit chybu modulu výstupního napětí přibližně šestkrát. Dalšího zlepšení výstupního napětí je dosaženo použitím v kombinaci s korekcí minimálních dob sepnutí, díky čemuž klesne THD výstupního napětí o 6,5 %.

Jednotlivé funkcionality měniče byly odzkoušeny jak v simulaci, tak měřeními na reálném hardwaru. Výsledky teorie, simulací a měření se uspokojivě shodují. Díky výběru komutační a modulační strategie s důrazem na robustnost a spolehlivost funkce je možné provozovat měnič bez precizního měření vstupního napětí.

### Seznam použitých zkratek

ISVM	Indirect Space Vector Modulation – nepřímá modulace prostorového vektoru
DTC	Direct Torque Control – přímé řízení momentu
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Tranzistor
RB - IGBT	Reverse Blocking IGBT
SW	Software
HW	Hardware
PWM	Pulse-Width Modulation – pulzně-šířková modulace
OS	Operation System – operační systém
RT	Real Time – reálný čas
RTOS	Real Time Operation System – operační systém pracující v reálném čase
THD	Total Harmonic Distortion – celkové harmonické zkreslení
$T_s$	Spínací perioda modulátoru